

Messung der Expansion des Universums mit Gravitationswellen

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:
<https://ligo.org/science/Publication-GW170817Hubble/index.php>

Im August 2017 entdeckten Advanced LIGO und Advanced Virgo zum ersten Mal Gravitationswellen von zwei verschmelzenden Neutronensternen. Dieses bahnbrechende Ereignis wurde auch von zahlreichen Teleskopen, die auf Licht über das gesamte elektromagnetische Spektrum empfindlich sind, beobachtet. Dies ermöglichte, den Ursprung der Gravitationswellenquelle eindeutig einer einzelnen Galaxie zuzuordnen. Durch die Kombination der Entfernung zur Quelle, unabhängig ermittelt aus den Gravitationswellendaten, mit der Radialgeschwindigkeit der Galaxie (aus den elektromagnetischen Daten) ist uns eine neue und völlig unabhängige Bestimmung einer bedeutenden Größe in der Kosmologie gelungen: Der gegenwärtigen Expansionsrate des Universums. Diese Messung markiert den Beginn einer spannenden, neuen Ära der Gravitationswellen-Kosmologie.

Eine kurze Geschichte der Hubble-Expansion

Es ist fast 90 Jahre her, dass Astronomen das erste Mal herausfanden, dass sich unser Universum ausdehnt - eine bahnbrechende Entdeckung, die unser Verständnis für den Kosmos revolutionierte, der [Urknalltheorie \(Big Bang Theory\)](#) zugrundeliegt und heute einen der Eckpfeiler der modernen [Kosmologie](#) darstellt.

Eine zentrale Figur bei dieser Entdeckung war [Edwin Hubble](#), nach dem das [Hubble-Weltraumteleskop \(Hubble Space Telescope\)](#) benannt wurde. Für Galaxien im nahen Universum fand er eine lineare Beziehung zwischen dem Abstand und der Fluchtgeschwindigkeit weg von der Milchstraße (siehe Abbildung 2). Dies ist im Einklang mit der Auslegung, dass sich die Galaxien im Allgemeinen nicht *durch* den Raum bewegen, sondern durch die Ausdehnung des Raumes selbst auseinander driften. Dieses Phänomen der [universellen Expansion](#) trägt nun Hubbles Namen. Die aktuelle *Rate* der Expansion ist gleich der Proportionalitätskonstante in Hubbles linearer Beziehung, und wird [Hubble-Konstante](#) genannt. Sie wird mit dem Symbol H_0 bezeichnet und in Einheiten von Kilometern pro Sekunde pro Megaparsec (Einheitszeichen: Mpc. Ein [Parsec](#) ist eine astronomische Einheit für Abstände und entspricht ungefähr 3,26 Lichtjahren oder $3,086 \times 10^{16}$ m) ausgedrückt. Hubbles ursprüngliche Schätzung für H_0 war etwa $500 \text{ kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ (siehe Abbildung 2), dieser Wert wurde später als eine massive Überschätzung erkannt.

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts ist bereits eine große Vielzahl verschiedener Methoden zur Messung der Hubble-Konstante entwickelt und angewendet worden, die sich auf eine Vielzahl unterschiedlicher astrophysikalischer Daten stützen – einschließlich der Beobachtungen von (Pulsations-)veränderlichen [Cepheiden](#)-Sternen, [Typ-Ia-Supernovae](#), der [Tully-Fisher-Beziehung](#) und der [kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung \(CMB\)](#). Ein wesentliches Merkmal vieler H_0 -Messungen, die Daten aus dem nahen Universum verwenden, ist die Voraussetzung, zwei oder mehr Entfernungskindikatoren kombinieren zu

müssen. Dies wird auch als die „Leiter“ der [kosmischen Entfernungsmessung \(Cosmic Distance Ladder\)](#) bezeichnet. Methoden, die in der Lage sind, die „Sprossen“ dieser Leiter zu überspringen, können sehr nützlich sein. Hier beschreiben wir einen solchen völlig neuen Ansatz.

Zum Vergleich betrachten wir zwei sehr verschiedene unter den gegenwärtig „modernsten“ Messungen der Hubble-Konstante, die auf relativ kleinen bzw. sehr großen kosmologischen Maßstäben angewendet werden, und derzeit nicht miteinander konsistent sind: das [ShoES-Projekt](#), das Messungen an Cepheiden und Typ-Ia-Supernovae vereint, ergibt eine Hubble-Konstante, die etwa 8% größer ist als der Wert, der sich aus den CMB-Beobachtungen des [Planck-Satelliten](#) ergibt. Obwohl diese Diskrepanz nicht groß erscheint, und viel kleiner ist als die großen Widersprüche zwischen den verschiedenen Schätzungen der Hubble-Konstante, wie sie uns noch im 20. Jahrhunderts plagten, ist sie dennoch ein bedeutendes, ungelöstes Rätsel für die Kosmologie.

Ein neuer Ansatz: Standardsirenen

Wir stellen hier einen neuartigen Ansatz zur Messung der Hubble-Konstante mit Hilfe von Gravitationswellen vor. Zum ersten Mal wenden wir damit die revolutionäre Methode an, die vor mehr als 30 Jahren von Bernard Schutz in einer [wegweisenden Arbeit](#) vorgeschlagen wurde; weiter verfeinert wurde sie später in [diesem Artikel](#). Die Schlüsselidee dieser Methode ist die Schätzung der Entfernung einer Galaxie mittels der Beobachtung von Gravitationswellen, einer sogenannten „[Standardsirene](#)“, die das Gravitationsanalog einer astronomischen „[Standardkerze](#)“ ist - die absolute Leuchtstärke (und somit der Abstand) können direkt aus der Beobachtung abgeleitet werden. Standardsirenen sind kompakte Binärsysteme, bestehend aus Neutronensternen oder Schwarzen Löchern, deren ansteigendes „[Chirp](#)“-ähnliches Gravitationswellensignal entsteht, wenn sich diese kompakten Objekte vor der Verschmelzung immer schneller umkreisen. Die Form dieser Signale enthält Informationen über die Entfernung des Quellsystems, sowie über die Massen der kompakten Objekte und andere Parameter des Systems. Durch die Analyse der Wellenform können wir somit die Entfernung direkt abschätzen. Wir haben das [Gravitationswellensignal GW170817](#), das am 17. August 2017 von Advanced LIGO und Advanced Virgo erfasst wurde, verwendet, um die erste Standardsirenenmessung der Hubble-Konstante durchzuführen.

GW170817 ist das erste Mal, dass sowohl [Gravitations- als auch elektromagnetische Wellen](#) aus einer einzigen astrophysikalischen Quelle beobachtet wurden. Diese gemeinsame Beobachtung stützt die Hypothese, dass es sich bei der Quelle um die Verschmelzung zweier Neutronensterne handelte, und erlaubt auch die Identifizierung der Ursprungsgalaxie - eine Galaxie mit der Nummer [NGC4993](#) im Sternbild Hydra. Die Analyse der Wellenform von GW170817 ergab eine Entfernungsschätzung von etwa 44 Mpc, unter der Annahme, dass die Himmelsposition von GW170817 genau mit ihrem optischen Gegenstück übereinstimmt. Diese Abstandsschätzung hat eine Unsicherheit von etwa 15%, die sich aus einer Kombination aus dem instrumentellen Rauschen der Detektoren und der Tatsache, dass wir die Neigung der [Bahnebene \(Orbitalebene\)](#) des binären Neutronensternsystems in Bezug auf die Erde nicht genau kennen, ergibt. (Siehe auch [Abbildung 4](#).) Nichtsdestoweniger hat unsere Gravitationswellen-Entfernungsschätzung den großen Vorteil, dass sie vollkommen unabhängig von der „kosmischen Entfernungsleiter“ ist, die von rein elektromagnetischen Beobachtungen abgeleitet wird.

Die Standardsirenenmessung von H_0

Zur Abschätzung von H_0 müssen wir unseren Gravitationswellenabstand zu NGC4993 mit der Radialgeschwindigkeit der Galaxie, die der Hubble-Expansion entspricht, kombinieren. Wir können jedoch nicht einfach direkt die *gemessene* Radialgeschwindigkeit von NGC4993 verwenden. Denn die Struktur und auch die Expansion des Universums sind nicht überall glatt und gleichförmig: die „Klumpigkeit“ des Universums verzerrt die Hubble-Expansion auf kleineren Maßstäben, weil Galaxien zusätzliche Bewegungen (genannt „[Pekuliargeschwindigkeiten](#)“) aufgrund der Anziehungskraft sich in ihrer Nähe befindender Galaxien und Cluster (und auch unsichtbarer [Dunkler Materie](#)) erfahren. Die relative Nähe von NGC4993 bedeutet, dass ihre Pekuliargeschwindigkeit ein wesentlicher Teil der gemessenen Radialgeschwindigkeit ist, und nicht ignoriert werden kann.

Die Pekuliargeschwindigkeit von NGC4993 wird berücksichtigt, indem wir zuerst eine kleine Gruppe von Galaxien identifizieren, zu der diese Quellgalaxie gehört, und dann das Ergebnis einer größeren Untersuchung von galaktischen Pekuliargeschwindigkeiten verwenden, um für die Bewegung dieser Gruppe als Ganzes zu korrigieren. Dies ergab eine Schätzung der „Hubble-Geschwindigkeit“ für NGC4993 von knapp über 3000 km s^{-1} . (D.h. die Geschwindigkeit, die diese Galaxie hätte, wenn sie nur von der Hubble-Expansion beeinflusst würde.) Wir überprüften dieses Ergebnis zusätzlich, indem wir es mit anderen Methoden zur Rekonstruktion der galaktischen Pekuliargeschwindigkeiten auf großen Skalen verglichen, und fanden übereinstimmende Ergebnisse. Als Vorsichtsmaßnahme erlaubten wir eine große Unsicherheit in unserer Korrektur der Pekuliargeschwindigkeit (150 km s^{-1}); dennoch zeigt sich, dass der *dominante* Effekt in der Unsicherheit unserer Schätzung von H_0 noch immer die 15%-ige Unsicherheit in unserem Gravitationswellenabstand ist.

Abbildung 3 zeigt unsere Messung der Hubble-Konstante. Die durchgezogene blaue Kurve stellt die Wahrscheinlichkeit für verschiedene Werte von H_0 dar, mit einem Maximum bei $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Die gestrichelte und gepunktete Linie markieren jeweils die Grenzen der verschiedenen [wahrscheinlichen \(glaubwürdigen\) Intervalle](#) für H_0 – das sind die Bereiche, in denen die Hubble-Konstante, laut unserer Analyse, mit der jeweils angegebenen Wahrscheinlichkeit liegt. Abbildung 4 zeigt die gemeinsamen Einschränkungen für zwei Größen, H_0 und die Neigung des Neutronensternsystems. Dies veranschaulicht eine *Entartung* zwischen diesen beiden Größen; dies bedeutet, dass sich aus unseren Daten ähnliche Wahrscheinlichkeiten für mehrere Kombinationen von H_0 und der Neigung ergeben. Diese Entartung ergibt sich aus der signifikanten Wechselbeziehung zwischen dem Abstand und dem Neigungswinkel zur Quelle der Gravitationswellen: die Stärke der Gravitationswellen, die von einem weit entfernten Binärsystem abgestrahlt wird, das wir direkt von vorne oder von hinten sehen, ist ähnlich hoch wie für ein näheres, von der Seite betrachtetes System. Diese Entartung ist auch für die nur langsam abfallende Wahrscheinlichkeitskurve für hohe Werte von H_0 verantwortlich, siehe Abbildung 3, da die durchgezeichnete blaue Kurve im wesentlichen durch Projektion entlang der vertikalen Achse des Konturdiagramms (Abbildung 4) gewonnen wurde.

Schlussfolgerungen

Wir haben die erste Messung der Hubble-Konstante mit kombinierten Gravitationswellen- und elektromagnetischen Beobachtungen durchgeführt. Unsere Schätzung stimmt mit den Werten von H_0 überein, die sowohl aus relativ nahen als auch

aus sehr weit entfernten kosmologischen Daten ermittelt wurden, beispielsweise den ShoES- und Planck-Analysen. Besonders bedeutend aber ist, dass diese neue Messung völlig unabhängig von der traditionellen „kosmischen Entfernungsleiter“ abgeleitet wurde. Dies ist ein wichtiger Meilenstein in der langen Geschichte der Vermessung der Expansionsrate unseres Universums, und wir erwarten, dass zukünftige Gravitationswellen-Beobachtungen in der Lage sein werden, immer präzisere Messungen dieser fundamentalen Größe vorzunehmen. Die Ära der Gravitationswellen-Kosmologie hat somit begonnen!

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN:

- Der vollständige Fachartikel ist [hier](#) gratis abzurufen und wurde in der Zeitschrift „Nature“ [veröffentlicht](#).
- Websites von LIGO und Virgo: <https://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
- LIGO Open Science Center mit Zugang zu den Rohdaten von GW170817: <https://losc.ligo.org>

Allgemeinverständliche Zusammenfassungen weiterer Veröffentlichungen über die Entdeckung und Bedeutung von GW170817:

- [GW170817: Gravitationswellenbeobachtung eines Doppel-Neutronenstern-Systems](#)
- [Multi-Messenger-Beobachtungen eines verschmelzenden Doppelneutronensterns](#)
- [Gravitationswellen und Gamma-Strahlen von verschmelzenden Neutronensternen: GW170817 und GRB 170817A](#)
- [Suche nach dem Überrest von GW170817: Neutronenstern oder Schwarzes Loch?](#)
- [Vorhersage der Folgen der Neutronensternkollision, die GW170817 produzierte](#)
- [Die Herkunft von GW170817: Neutronensterne, Supernovae und Billard-Tricks](#)
- [Die Hintergrundsymphonie der Gravitationswellen von verschmelzenden Neutronensternen und schwarzen Löchern](#)
- [Suche nach hochenergetischen Neutrinos vom verschmelzenden Doppelneutronenstern GW170817 mit ANTARES, IceCube und dem Pierre-Auger-Observatorium](#)

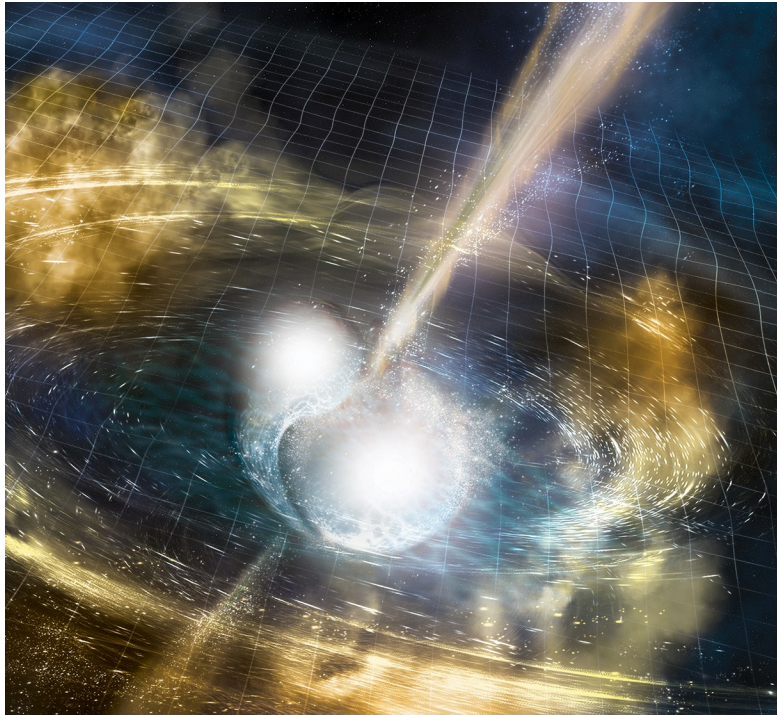


Abbildung 1: Künstlerische Darstellung zweier verschmelzender Neutronensterne. Die schmalen Strahlen repräsentieren den Gammastrahlenausbruch, während das wellige Raumzeitgitter die isotropen Gravitationswellen anzeigt, die von der Verschmelzung ausgehen. Wirbelnde Materiewolken, die von den verschmelzenden Sternen ausgestoßen werden, sind eine mögliche Quelle für das Licht, das bei niedrigeren Energien zu sehen war. Credit: National Science Foundation / LIGO / Sonoma State University / A. Simonnet.

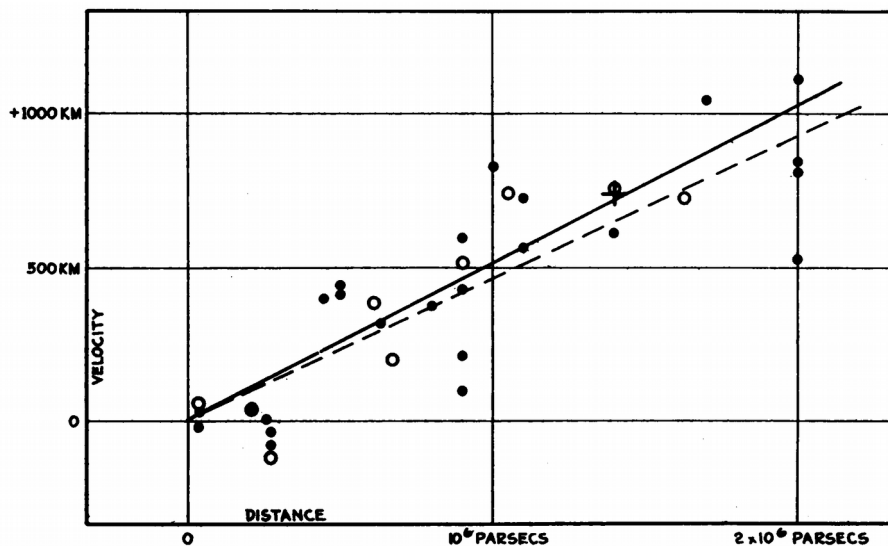


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Hubble-Beziehung, übernommen von Edwin Hubbles ursprünglichen Daten aus dem Jahr 1929. Die lineare Beziehung zwischen der Radialgeschwindigkeit (vertikale Achse, die in Hubbles Originalpapier fälschlicherweise in Kilometern angegeben ist) und der Entfernung (horizontale Achse, in Parsecs) ist deutlich zu erkennen - obwohl es eine beträchtliche Streuung in den Daten gibt und sich der Entfernungsbereich nur über etwa 2 Mpc erstreckt. Credit: Proc. Nat. Acad. Sciences. (1929)

Abbildungen aus dem Fachartikel

Weitere Informationen zu diesen Abbildungen finden sich in der [vollständigen Veröffentlichung](#).

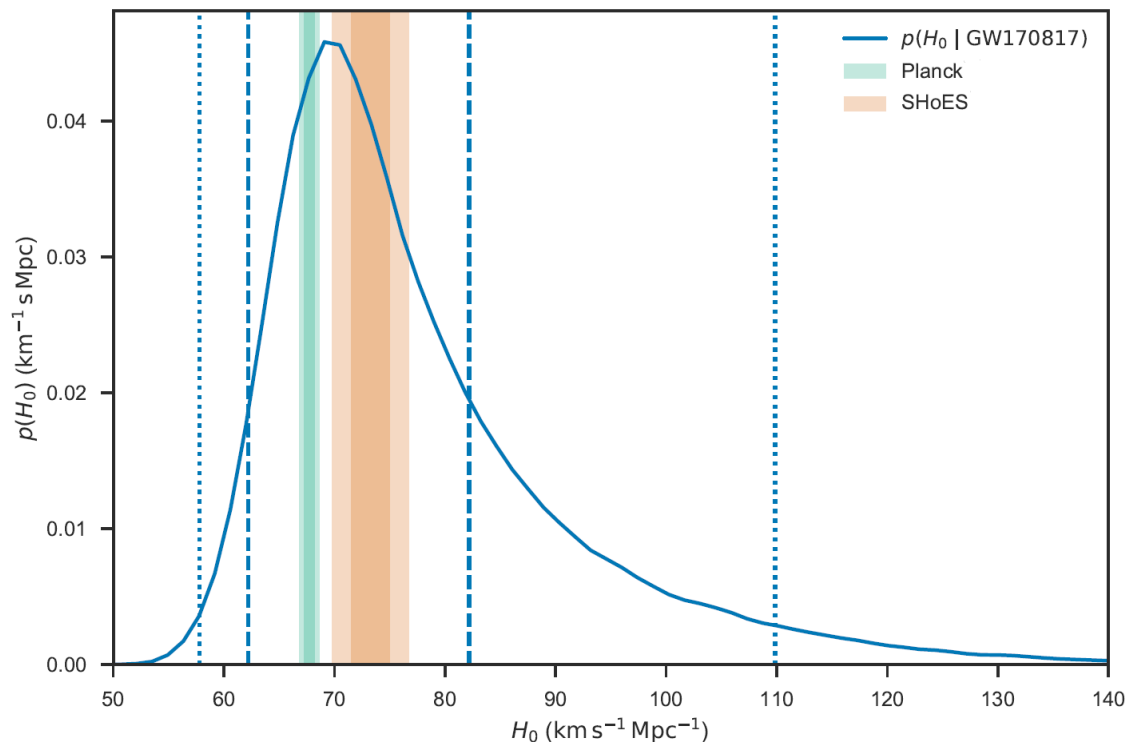


Abbildung 3: Diagramm, das unsere Schlussfolgerung zur Hubble-Konstante zusammenfasst. Die relative Wahrscheinlichkeit verschiedener Werte von H_0 wird durch die durchgezogene blaue Kurve dargestellt, die bei $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ihr Maximum erreicht. Die gestrichelten und gepunkteten blauen vertikalen Linien zeigen jeweils die Grenzen der glaubhaften Intervalle für H_0 bei 68,3% und 95,4% Wahrscheinlichkeit. Die vertikalen grünen und orangefarbenen Streifen stellen die Einschränkungen für H_0 aus zwei aktuellen Analysen dar, die ausschließlich elektromagnetische Daten nutzen: die grünen Bänder zeigen den Wertebereich aus der Analyse von CMB-Daten, die durch den Planck-Satelliten abgeleitet wurden; die orangefarbenen Bänder zeigen den Wertebereich der SHoES-Analyse, welche die Daten veränderlicher Cepheiden und von Typ-Ia Supernovae aus dem relativ nahen Universum kombiniert. Die dunkleren und helleren Bändern zeigen die glaubhaften Intervalle jener Analysen bei 68,3% und 95,4%. Auffällig ist, dass die Planck- und ShoES-Ergebnisse auf einem Niveau von 95,4% Wahrscheinlichkeit nicht miteinander übereinstimmen. Unser Gravitationswellen-Ergebnis ist jedoch im Einklang mit beiden Ergebnissen.

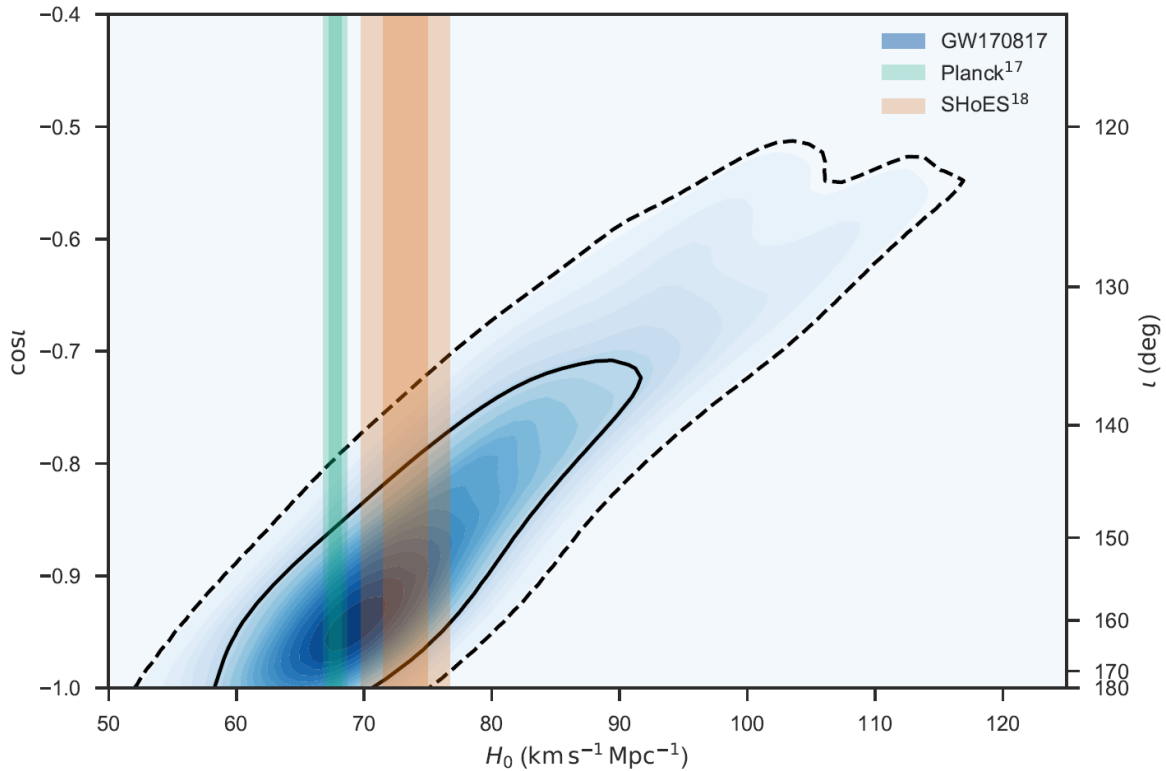


Abbildung 4: Konturdiagramm, das zusammenfasst, was unsere Analyse in Kombination über den Wert der Hubble-Konstante (horizontale Achse) und die Neigung der Bahnebene des Doppelneutronenstermsystems (vertikale Achsen - die rechte Achse zeigt Neigungswinkel in Grad und die linke Achse zeigt den entsprechenden Kosinus des Neigungswinkels) aussagt. Die dunkelste Schattierung zeigt die Region mit der höchsten Wahrscheinlichkeit. Man beachte die starke Korrelation zwischen dem Neigungswinkel und der abgeleiteten Hubble-Konstante. Dies liegt an der starken Korrelation zwischen dem Abstand und dem Neigungswinkel für die Quelle der Gravitationswellen: die Stärke der Gravitationswellen, die von einem weit entfernten Binärsystem emittiert werden, das wir direkt von vorne oder direkt von hinten betrachten, ist ähnlich groß wie für ein von der Seite betrachtetes Signal näheren Ursprungs. Der Bereich mit der höchsten Wahrscheinlichkeit in diesem Diagramm stimmt mit einem Neigungswinkel von annähernd 180 Grad überein – dies bedeutet, dass wir die Quelle von GW170817 wahrscheinlich von nahe ihrer Rückseite beobachtet haben.